

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ НЕСУЩЕГО КОЛЕБАНИЯ В ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

Лучинин А.С., Трухин М.П.
Институт радиоэлектроники и информационных технологий
Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина
Ул. Мира, 32, г. Екатеринбург, 620002, Россия
тел.: 8-903-079-75-66, e-mail: mptru@mail.ru

Аннотация — Предложен и обоснован алгоритм оценивания частоты и фазы несущего колебания по его дискретным отсчетам. Результаты моделирования показали эффективность алгоритма при малом числе отсчетов на период колебания и высоком уровне аддитивного широкополосного шума. Продемонстрирована возможность использования этого алгоритма для управления системой фазовой подстройки частоты в цифровых системах связи.

ALGORITHM OF RECOVERY FREQUENCIES AND PHASES OF CARRYING FLUCTUATION IN DIGITAL COMMUNICATION

Luchinin A.S., Trukhin M.P.
Institute of radio electronics and information technologies
The Ural Federal University it B.N.Eltsin
32, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Ph.: 8-903-079-75-66, e-mail: mptru@mail.ru

Abstract — The algorithm an estimation frequencies and phases of carrying fluctuation on his discrete samples is offered and proved. Results of modeling have shown its efficiency at small number of samples for the period of fluctuation and a high level of additive broadband noise. The opportunity of use of this algorithm for management of system of phase-locked loop frequency synthesizer in digital communication systems is shown.

I. Введение

Повышение требования к качеству передачи данных в цифровых системах связано, в первую очередь, с улучшением работы систем синхронизации, применяемых для автоматического поддержания параметров сигналов, генерируемых в приемнике (частота и фаза несущей), а также определения моментов времени начала тактовых интервалов. В целом задачи синхронизации являются, пожалуй, самыми неоднозначными с точки зрения методологии и теории оптимальности [1,2].

Однако восстановление несущей частоты может быть достаточно простым, если в спектре принятого сигнала есть спектральная составляющая несущей частоты f_0 . В этом случае выделение несущей частоты может быть выполнено с помощью соответствующего пассивного узкополосного фильтра или схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

В то же время большинство современных систем связи работают с подавлением несущего колебания, которое не содержит полезную информацию, поэтому ФАПЧ не может восстановить несущее колебание на приемном конце линии связи. Для синхронизации несущего колебания необходимо устранить модуляцию, восстановив тем самым его составляющую в спектре принятого сигнала. Сделать это можно путем возведения входного сигнала в степень (схема А. А. Пистолькорса). Другой разновидностью схем восстановления несущего колебания является синфазно-квадратурная петля, предложенная Д. Костасом.

Названные методы имеют сейчас исторический интерес, поскольку в современных системах связи применяются сложные виды амплитудно-фазовой модуляции [3].

II. Основная часть

Модель сигнала. При цифровой передаче входной сигнал — это двойная синхронная последовательность импульсов в квадратурных каналах, следующих через интервал дискретизации T_s . Группы пар этих импульсов, представляющих наборы комплексных чисел, несут информацию о передаваемых символах, следующих со скоростью $R = 1/T$, где T — интервал между последовательными символами.

Рассмотрим задачу оценки максимального правдоподобия частоты $f \leq 1/(2T_s)$ комплексного колебания $\exp\{j2\pi f t\}$, представленного N дискретными отсчетами

$$r_k = e^{-j2\pi f k T_s} + v_k = |r_k| e^{-j(2\pi f k T_s + \theta)} + v_k, \quad (1)$$

где θ — неизвестное случайное значение фазы с равномерной плотностью распределения вероятности на интервале $[0, 2\pi)$; $v_k = v_{k,c} + jv_{k,s}$; $\{v_{k,c}\}$ и $\{v_{k,s}\}$ — независимые нулевые средние гауссовских случайных последовательностей, обе с автокорреляционной функцией $R_v(k) = \sigma^2 \delta_k$ (δ_k — символ Кронекера, смещенный на k отсчетов). Примеры осциллограмм дискретных отсчетов уна приемной стороне представлены на (рис. 1).

Синтез алгоритма. Умножение каждого k -го комплексного отсчета r_k на вращающий множитель $e^{-j2\pi \hat{f} k T_s}$ устраняет мнимую составляющую отсчета

$$r_k e^{-j2\pi \hat{f} k T_s} = \text{real}(r_k) = |r_k| \quad (2)$$

при совпадении частоты несущего колебания f с оценкой частоты \hat{f} . Очевидно, сумма квадратов $|\sum_{i=1}^N r_i e^{-j2\pi \hat{f} i T_s}|^2$ полученных таким образом величин есть энергия E_r дискретизированной гармоник на интервале $(0, NT_s)$.

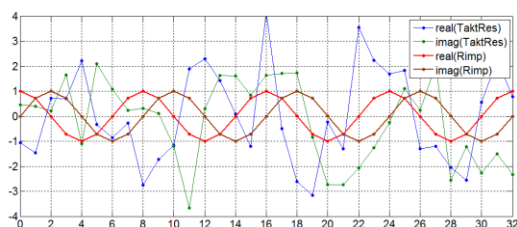


Рис. 1. Осциллограммы четырёх периодов немодулированного колебания и принятого в шумах сигнала ($Q = 0$ дБ, QAM4, 8 отсчётов на период)
Fig. 1. Oscillograms of four periods of not modulated fluctuation and the signal accepted in noise ($Q = 0$ дБ, QAM4, 8 samples for the period)

Максимум этой суммы возможен только при совпадении указанных частот f и \tilde{f} . Поэтому для определения частоты несущего колебания по его квадратурным отсчётам можно использовать зависимость $\left| \sum_{i=1}^N r_i e^{-j2\pi\tilde{f}iT_s} \right|^2$ от частоты \tilde{f} , представив её эквивалентом функции максимального правдоподобия

$$\Lambda(\tilde{f}) \triangleq \left| \sum_{i=1}^N r_i e^{-j2\pi\tilde{f}iT_s} \right|^2 = \sum_{k,m=1}^N r_k \tilde{r}_m e^{-j2\pi\tilde{f}T_s(k-m)} \quad (3)$$

где \tilde{f} – оценка величины частоты несущего колебания f . Максимальное значение правой части (3) по отношению к \tilde{f} даёт максимальную оценку правдоподобия \hat{f}_{ML} (рис. 2), которая соответствует f , а также является асимптотически эффективной при $N \rightarrow \infty$. Её дисперсия равна дисперсии несмещённой оценки Крамера-Рао σ_{CR}^2 .

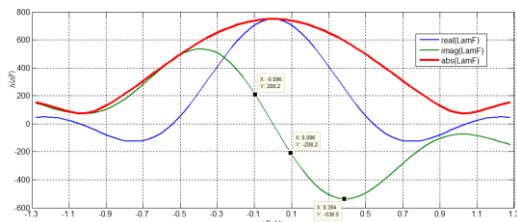


Рис. 2. Составляющие функции оценивания
Fig. 2. Structure of function of an estimation

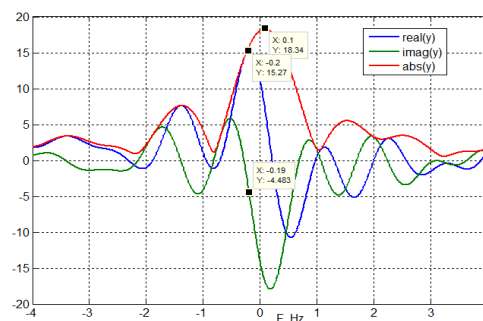
Если предположить, что один из дискретных сигналов в формуле (3) является сигналом гетеродина на приёмной стороне, то по этой формуле можно вычислить не только частоту, но и сдвиг по частоте между ними, а также фазовые сдвиги между принятым сигналом и колебанием гетеродина:

$$\Lambda(\Delta\tilde{f}) = \sum_{k=1}^N r_k u_k e^{-j2\pi\Delta\tilde{f}kT_s}, \quad (4)$$

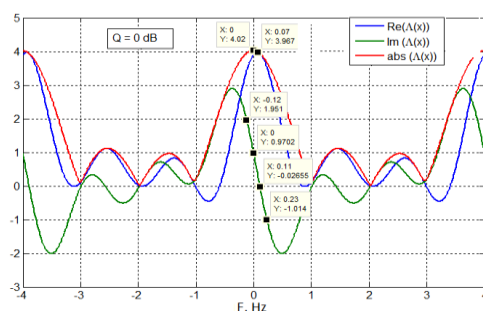
где $u_k = e^{j2\pi f_g k T_s}$, $1 \leq k \leq N$ – отсчёты колебания гетеродина амплитудой 1 В; $\Delta\tilde{f}$ – оценка смещения частоты несущего колебания относительно частоты гетеродина.

Анализ алгоритма [4]. Смещение принятого сигнала по частоте отражается на смещении максимума модуля функции оценивания, в то время как смещение по фазе приводит лишь к смещению мнимой составляющей этой функции по оси частот. Чтобы убедиться в этом, проведено моделирование для варианта дискретизации, близкого к граничной частоте (частоте Котельникова), а именно, для четырёх точек на один период (рис. 3).

Таким образом, исследованный с помощью моделей дискретных сигналов алгоритм (4) действительно может служить основой измерителя сдвига несущей частоты и её фазы, и, тем самым, вполне может выполнять роль дискриминатора в системах ФАПЧ различных видов модуляции (QAM, QPSK, PSK и т. д.).



(а)



(б)

Рис. 3. Составляющие функции оценивания при сдвиге по частоте на +10 % (а) и фазе на $-\pi/7$ (б)

Fig. 3. Structure of function of estimation at shift on frequency on +10 % (a) and a phase on $-\pi/7$ (b)

Дисперсию несмещённой оценки можно найти по формуле

$$\sigma_{CR}^2 = \frac{3}{2\pi^2 T_s^2} \frac{1}{\rho N(N^2 - 1)}, \quad (5)$$

где ρ – отношение несущая/шум (сигнал/шум).

III. Заключение

1. Синтезирован алгоритм оценивания сдвига частоты и фазы несущей принятого колебания относительно заданной частоты и начальной фазы гетеродина или управляемого генератора ФАПЧ. Основой алгоритма является вычисление корреляционных характеристик дискретных последовательностей отсчётов обоих колебаний.

2. Анализ алгоритма в среде MATLAB показал возможность его применения в системах синхронизации цифровой связи.

IV. Литература

- [1] Shachtarin, B.I. Analysis of hybrid system of phase and clock synchronization / B.I. Shachtarin, I.A. Kulkov. The bulletin of MGTU. Sulfurs. Instrument making. 2013.
- [2] Gardner F.M. Phaselock Techniques / F.M. Gardner. New York: John Wiley and Sons, 1979.
- [3] Takasaki Y. Digital Transmission Design and Jitter Analysis / Y. Takasaki. Norwood, MA: Artech House, 1991.
- [4] Algorithm of an estimation and recovery frequencies and phases of carrying fluctuation in digital communication/Trukhin M.P., Luchinin A.S. / International Conference on Computer Analysis of Images (ICCAI-2016). Ekaterinburg, 2016.